

締固め土の構造と工学的性質の相関性に関する微視的研究

MICROSCOPIC RESEARCH ON THE RELATIONSHIPS BETWEEN THE
FABRIC AND ENGINEERING PROPERTIES OF COMPACTED SOILS

松尾 新一郎*・宋 永焜**

By Shinichiro Matsuo and Yung-Kung Sung

1. まえがき

締固め土、あるいは Mass のような構造体を構成しているものは、固体状の土粒子、土粒子の表面をとりまき、かつ間げきに存在している液体（間げき水）、および気体（空げき）である。これは Terzaghi 以来から、今日に至るまでの巨視的な考え方である。Soil Mass が砂質土である時には、この考えをもとにして工学的解釈や判断を下しても、大過なくあてはまって来たものであるが、この Mass の中に粘土粒子が入って来ると、その挙動はあっそう複雑化し、上述の構成要素だけでは、十分に解釈できない。たとえば、締固め粘性土の膨張性、異方性、地すべり粘土中のモンモリナイトの膨張性、および圧密曲線にあらわれる乱された粘土と乱されない粘土の圧密挙動の差異などがその良い例である。したがって、ここに巨視的解釈を補足し、またはそれ自体、独自の理論に立脚した微視的な考え方が必要になってくる。

さて、締固め土の挙動を微視的に見るとき、どんな要素が入って来るか、それを大まかに分けてみると、次のようになる。

- | | | | |
|------------------|---|---|-------------|
| 締固めの挙動を支配する微視的要素 | } | (1) 土粒子の形状、大小 | } Structure |
| | | (2) 一次、二次（粘土鉱物）鉱物表面の物理的性質 | |
| | | (3) 土粒子、特に粘土粒子の幾何学的配列 (fabric) | |
| | | (4) 粘土粒子間の物理化学的作用 (Diffuse ion layer) | |
| | | (5) 間げき水の種類、濃度 (Soil-water Interaction) | |

上に列記したように、一般に締固め土の構造を指す時には、(1)～(4) 項を包括するものであるが、本研究では、単純化のため、(4) 項の土粒子間の物理化学的作用

を対象にせず、主として土粒子の幾何学的配列 (fabric) だけに焦点をおいて論を進めた。工学的な土質試験には、締固め試験、軸方向収縮試験、締固め方法や締固めエネルギーの違いによる強度試験、および透水試験を行ない、これらを補助的に実証する微視的手段として、電子顕微鏡による観察を行なった。

土質工学の立場からの土の微視的な研究が重要である理由は、ある領域内の土に対して、応力の系が外部から巨視的に作用したときの土の応答を微視的な状態から理解しえ、また、そのミクロ的な粒子間相互作用の統計学的処理を経て、ある一つの普遍的概念を抽出しえる可能性を内蔵しているところにある。

2. 過去の研究概要

工学的立場から、土の構造の重要性を指摘したのは Terzaghi¹⁾ (1925) が最初であり、彼は綿毛、蜂巢、単粒構造の概念を提出した。続いて、Goldschmidt²⁾ (1926) は、粘土の cardhouse 構造を、Casagrande³⁾ は、蜂巢構造生成の理論を発表した。第二次大戦後、土質力学の急速な発展とともにいち早く変形のメカニズムを粒子配向の立場より説明しようとしたのが Buessem ら⁴⁾ (1954) であり、1957年には Tan⁵⁾ により、粘土堆積土の構造模式図 (図-1) が示され、Rosenquist⁶⁾ (1959) が、当時ようやく実用化に入った電子顕微鏡を用いて、この構造の実在性を証明した。一方 Lambe^{7), 8), 9)} (1953, 1960) は、理化学の分野におけるイオン拡散二重層 (Diffuse ion

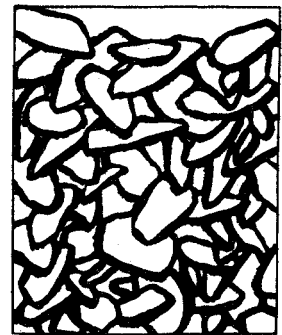


図-1 粘土配向の立体模式図
(Tan, 1957 による)

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木工学科

** 学生会員 工修 京都大学大学院土木工学専攻博士課程学生

layer) 理論に着目し、この理論による土粒子相互間の物理化学的作用と、外部から加えられた力による幾何学的配列の変化を締固め土の理論に適用して注目を浴びた(図-2)。

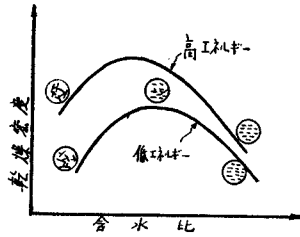


図-2 含水比と締固めが粒子配列に及ぼす影響(Lambe, 1960による)

Seedら¹⁰⁾(1961)は、Lambeの理論に基づいて、締固め土の工学的性質を構造の立場から説明したが、これはいずれも粒子がすべて板状粒子であるかのように説明されている欠点があるので、Trollopeら¹¹⁾(1961)により、板状粒子内に粗粒子などが入った場合の基本的な考え方が提示された。他方では、力学作用に伴う構造の変化を半微視的に直接または間接的に、観測しようとする試みが行なわれた。たとえば、Mitchell¹²⁾(1956)は、偏光顕微鏡を用い、圧密などの力学作用に伴う粒子の配向変化度を定性的に研究し、続いてMorgensternら¹³⁾(1967)により、定量的な取り扱いが行なわれ、先のMitchellの研究の欠点を補った。またMartin¹⁴⁾(1966)は、X線を用いて、peak ratioの概念による粒子配向度の定量的解析を試みたが、十分成功するに至らず、後にはQuigleyら¹⁶⁾(1966)が、同じく、X線を用いて粘土の異方性的構造の圧密現象を解析した。そのほか、近年には、Mitchell^{16), 17)}ら(1965, 1968)の土の構造に関連した透水性の研究、電気分散の研究およびMatalucli¹⁸⁾(1970)による、レス土のせん断強度の研究がある。

近年来、電子顕微鏡の目ざましい発達に伴い、微視的手法による極小粒子の直接観測から、土の構造の研究をしようとする気運が活発になって来た。このような研究では、土質特有の試料作製の複雑性、困難性のため力学作用と構造の変化の関係を明確にとらえるに至らず、現今まで試料作製の技術克服に終始している感がある。それにしても、電子顕微鏡の実用化は、土質構造の研究にとっても進歩の一里塚である。この中で、分散土でなく、Bulk clayの試料作製法を最初に発表し、現在もなおその基本的手法が応用されているのは、1955年Comerら¹⁹⁾によって発表された技術である。その後、土質工学の立場から、Sloaneら²⁰⁾(1966)がReplica法試料、透過式電顕によって、カオリン締固め土の粒子配向を、Smart²¹⁾(1967)は樹脂包埋による、切片試料を用いて、圧密粘土の粒子配向を研究した。そのほかにも、Push²²⁾(1967)が切片試料でquick clayのミクロ的構造を研究し、Mitchellら²³⁾(1966)が、土質安定の立場から、Soil-Cementの構造を、1968年にはWilloughbyら²⁴⁾(1968)がSoil-limeの構造を研究した。上述の電子顕微鏡は、すべて透過式電子顕微鏡を用いたものであるが、この二、三年に走査電子顕微鏡(Scanning Electron Microscopy)が発達し、これを用いた研究が、Roscow²⁵⁾(1967), Guillot²⁶⁾(1969)によって、発表されている。

透過型電子顕微鏡と走査電子顕微鏡の優劣の比較は、その試料作製法の容易さ、立体観、倍率、および焦点深度にある。この比較を表-1に示す。

土の構造の研究において、特に重要なのは立体観とPseudo-Replicaの問題である。立体観の増大は土の構造の判断を容易にさせ、また透過式電子顕微鏡によるPseudo-Replicaの可能性は、従来からこの方面の研究の重大な欠点であった。分散土では、シルト大の粒子を透過式電顕で観測する試料作製も困難である。これらの諸点を考え合わせるとき、走査電子顕微鏡が実用の範囲内において、土質構造の研究に優れていることがわかる。

土の構造の研究において、特に重要なのは立体観とPseudo-Replicaの問題である。立体観の増大は土の構造の判断を容易にさせ、また透過式電子顕微鏡によるPseudo-Replicaの可能性は、従来からこの方面の研究の重大な欠点であった。分散土では、シルト大の粒子を透過式電顕で観測する試料作製も困難である。これらの諸点を考え合わせるとき、走査電子顕微鏡が実用の範囲内において、土質構造の研究に優れていることがわかる。

表-1 透過式電子顕微鏡と反射式走査電子顕微鏡の比較

| 事項 | 透過式電子顕微鏡 | 反射式走査電子顕微鏡 | 注 |
|--------------------|--------------------|-----------------|---|
| 試料作製難易 | 複雑 | 簡単 | Replica法、切片法、設備、操作ともに複雑 |
| 立体観 | Shadowingによりやや増進 | 顕著 | 立体観は走査型の最大特長である |
| 倍率 | 大(実用倍率5000~30000) | 比較的小(約15000倍以下) | 砂粒子表面構造観測時の過大倍率は無意味 |
| 走査範囲 | 小 | 大 | 走査型1mm ² ~4μ ² 面積内を逐次走査可能 |
| 焦点深度 | 小 | 大 | ゆえに走査型はRough Surfaceの観測に適する |
| Pseudo-Replicaの可能性 | あり | なし | 土粒子完全溶解困難のためPseudo Replicaが得られる |
| 分散粒子の観測 | シルト大のReplica試料作製困難 | 任意試料で観測可能 | シルトの表面構造を指す |
| 分解力 | 大 | やや小 | 走査型の方、やや小でもfabricの研究に支障なし |

以上の諸研究における欠点や不備を列挙し、その中に占める本研究の特異点をあげると次のようになる。

(1) 工学的挙動の差異により、構造の変化を説明する。Lambe^{8), 9)}, Seedら¹⁰⁾の論文は、推定の域を出ないものが多い。本研究では、まず、締固め土が含水比とともに変化する粒子配向の実在性を証明し、以後、この実在性を出発点として論じた。

(2) 電子顕微鏡によるSloane²⁰⁾, Smartら²¹⁾の研究は、粒子配向の現象のみに重点をおき、それに伴う工学的性質の変化はあまり説明されていない。本研究では、電子顕微鏡による粒子配向の観察のほかに、それを締固め土の軸収縮、強度、透水性などの工学的性質に関連して説明している。

(3) Lambe^{8), 9)}, Seedら¹⁰⁾の論文は、土粒子をすべて板状粒子と仮定して、構造変化を説明しているが、締固め土の中には、石英、長石などの一次粒子(2mm以下の土粒子内)、また粘性土中には、板状粒子でない粒

状粒子（関東ロームのアローフエン等）、中空管状（マサ土中のハロイサイト）、繊維状などの粘土鉱物が含まれている場合が多い。そのような場合には、構造変化はまた板状粒子の場合と異なる。たとえば、板状結晶のカオリナイトと、管状結晶のハロイサイトにおいて、それぞれペーストを作り、モールド内で圧力をかけると図-3に示すような線配向性、面配向性を示すことが報

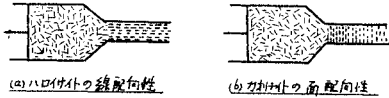


図-3 配 向 性

告されている²⁷⁾。これは本研究の問題提起を裏づけるものである。それゆえ、この研究では、締固め土を構成する各粒子の大小、形状（粘土鉱物）、表面構造（砂質土）をまず電子顕微鏡で調べ、その構成要素の実体を明らかにした。

(4) 透過型電子顕微鏡による過去の研究では、Replica法、切片法のいかににかかわらず、土の乾燥、切断や樹脂の包埋時における攪乱のため、未攪乱構造を代表するものとは断定しがたい。特に、Replica法によるものは、Pseudo-Replicaになる可能性が強く、本研究では、特にこの点に留意したが、この欠点を補う上においても、走査電子顕微鏡の併用が望ましい。この意味において、本研究は十分その欠点を補っている。

(5) 関東ローム、マサ土は、おのおの東日本、西日本を代表する特殊土である。関東ロームは、球状のアローフエンを含む高含水比の土で、締固め時における特異な性質²⁸⁾はよく知られている。また、マサ土は、石英、長石の一次鉱物のほかに、風化の進んだものは管状のハロイサイトを多量に含んだ破碎しやすい土である。両者の粘土分はともに板状ではない。この研究は、この特殊性に着目し、その工学的性質と構造の関係の一端を明らかにしている。

3. 試料と実験方法

(1) 締固め装置

締固め曲線および構造観測用の電顕試料はすべて、ハーバード小型締固め試験機を用いて行なった。そのほか静的締固め試験装置、衝撃式締固め試験装置は各電動式一軸圧縮試験装置による緩慢の圧縮、ランマによる締固め試験装置で行なった。工学的性質測定のための試料は、2 mm以下の試料を用い、電顕試料用のマサ土、および大阪湾海底粘土は2 μ以下の試料を用いた。モンモリナイトは市販のままのものである。なお、マサ土は京都比

叡山、関東ロームは千葉県市原市において採取したものである。

(2) 透過式電顕による、直接観測用分散試料の作製法

- a) すり針ですった試料 50 mg, 蒸留水 70 cc, 5% ピロリン酸ナトリウム四滴, ブチルアミン (buthylamine) の希釈液 (1:700) 30 cc の比率で試験管に入れ、よく振って混合させた後、24 時間放置する。
- b) 15 分間、超音波分散装置で分散させる。
- c) 手で十分振った後、 $< 2 \mu$ 粒子を Stockes の法則にしたがって、5 cm~10 cm 下の分散粒子をピペットで採取する。
- d) カーボン膜で補強したコロジオン膜張りシートメッシュ上に一滴落す。
- e) 自然乾燥後、真空中で、 30° ~ 45° の角度から、白金パラジウムのシャドーイング (Shadowing) を施して、検鏡試料とする。

(3) 透過式電顕による、締固め土の構造観測用 Replica 試料の作製法

原則的には、ポリスチレンを用いる二段 Replica法であるが、その詳細を記すと次のようになる。

- a) 試料を真空デシケータ中で急速乾燥させた後、載荷方向 (V 試料) およびそれに垂直 (H 試料) な二方向から切断し、5 mm 角位に観察面を平らに成型する。表面についた浮動試料はガス スプレーを使用して除去する。
- b) 厚さ約 3 mm のポリスチレンシートを 160°C の加熱温度下で作製する。
- c) 成型した試料面を溶融したポリスチレンシートにおしつける。この場合、スライド ガラスを上下に添加し、クリップではさんで、徐々に加熱、加圧した方がよい (写真-1)。加圧後、冷却するまで待ってから、クリップをはずす。
- d) 余分の土は切り取り、残余の付着土は 50% HF 酸に最小 3 時間浸して溶かす。
- e) 蒸留水でよく洗浄し、粒子がまだついているかどうかを約 80 倍の光学顕微鏡で調べる。
- f) 粒子がまだついているならば、おのおの HF 酸、蒸留水による溶解、洗浄をくり返す。
- g) ポリスチレン面に、真空中で 45° の角度から、白金パラジウムのシャドーイング、ついで、垂直方向からのカーボン蒸着を施す (写真-2, 3)。
- h) 蒸着面をヒゲソリ刃で 3 mm 角に切り、二塩化エチレン中に入れて、ポリスチレンを溶かすと、膜が浮上してくる。



写真-1 ポリスチレンシートへ、
試料面を転写

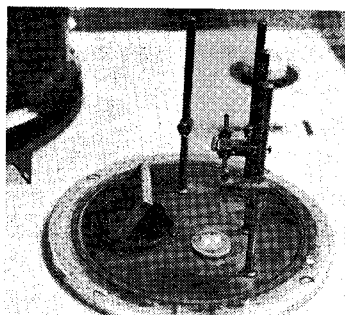


写真-2 真空蒸着、試料配置



写真-3 電頭試料、真空蒸着

i) 浮上膜をすくいあげ、さらに清浄な二塩化エチレン液に数時間浸し、後すくいあげて、検鏡試料とする。

(4) 砂質土表面構造観察用、Replica 試料の作製法

a) 砂粒子の選択と洗浄——多角性の粒子を取り除き、2 mm~0.5 mm 間の粒子を選び、硝酸、蒸留水、塩化第二錫と塩酸の混合液、蒸留水の順でおおの30分ずつ、沸騰させて洗浄する。

b) アセチルセルロースフィルムへの転写——スライドガラス上に、ビニールテープで貼りつけたフィルム上で、酢酸メチルに浸した砂粒子を軽く押しつける。数分後、注意深くピンセットで撤去する。

c) シャドーイング——真空中で 45° の角度から、白金パラジウムのシャドーイング、ついで垂直方向からのカーボン蒸着を施す。

d) formvol 膜補強——クロロホルムに溶かした formvol の 2% 溶液を試料の Replica 面に流す。クロロホルムはすぐ蒸発し、formvol は Replica 膜を補強する。

e) メッシュ上に固定——Replica 膜を 3 mm 角に切り、シートメッシュ上におく。

f) アセチルセルロース膜溶解——Replica 膜をのせたメッシュを金網で張ったフレーム上におき、その全体をまたすり合わせの良いシャーレに入れた後、酢酸メチルを側壁から静かに試料の高さまで注入する。密閉して、約 10 分後に液を交換し、この操作をくり返す。

g) formvol 膜溶解——アセチルセルロース膜溶解と同じ要領で、残余の formvol 膜をクロロホルムで溶解させる。完全に膜を溶解させた試料を検鏡試料とする。

(5) 走査電子顕微鏡試料の作製法

a) 試料成型——透過式電頭試料と同じ要領で、直径 5 mm、厚さ 5 mm 以内に成型する。

b) 試料固定——試料台に電導性接着材（たとえばドータイト）をつけて固定させる。砂粒子は洗浄後の試料を接着材をつけた試料台上にふりまく。

c) 金蒸着——反射性を促進するため真空中で試料台を回転させながら、金粉末を厚さ約 200 Å 蒸着する。蒸着試料はそのまま検鏡試料とする。

(6) 透水試験

a) 透水試験装置——すべて図-4 に示すような、変水位透水試験装置をもって行なった。この場合、透水円筒と締固め用のモールドは同一のもので、図-5 に示し

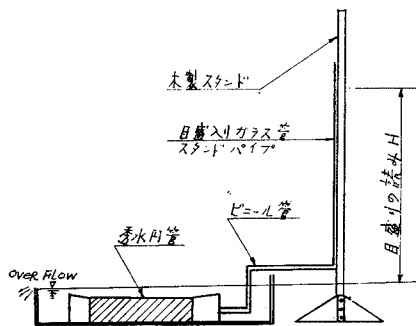


図-4 変水位透水試験装置

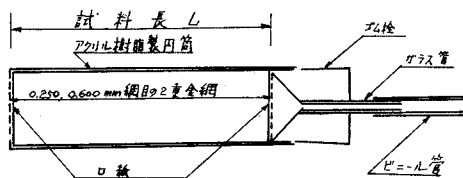


図-5 透水円筒

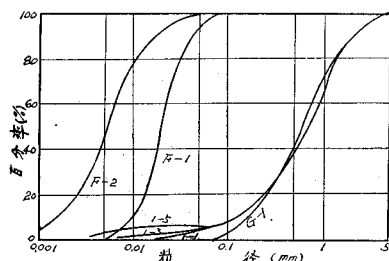


図-6 F-1, F-3, G-1, No. 1 群の粒径加積曲線

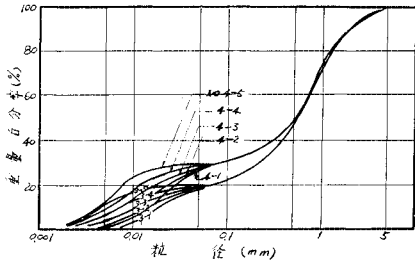


図-7 No. 4 群の粒径加積曲線

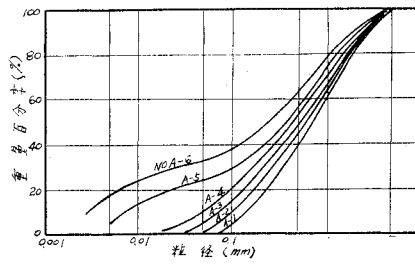


図-8 水ふりした土の粒径加積曲線

7) の試料を作製した。この試料調整法は、なるべく自然土の状況に適合させるため調整したものであるが、粗粒土の配向におよぼす影響を段階的に知るために、水ふるい法によりある粒径以下の試料を

たようなものである。寸法は直径 4.6 cm, 長さ 20 cm のアクリル樹脂製である。

b) 透水試験用試料——用いた試料は、マサ土に属するものであるが、細粒土の透水性にあたる影響を通して土の構造にあたる影響を調べるため、試料は人工的に調節した。まず 図-6 に示すように、細粒土に属する、F-1, F-2, 粗粒土に属する、G-1 を人工的に混合して、No. 1 群 (図-6), No. 3 群, No. 4 群 (図-

取り去り、この限界を逐次変化させて作製したのが、図-8 のような粒径加積曲線を持つ試料である。また、細粒土の影響を知るためには、0.074 mm 以下の粒度分布が 図-9 になるような試料を用いた。これらの試料を用いて、締固め土の透水性、構造の変化を試験するために、図-5 に示すモールド中に試料を三層に分け、ランマーによる Impact 締固め法で供試体を作った。

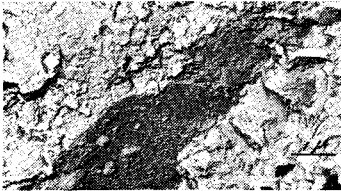


写真-4 長石のカオリナイト化

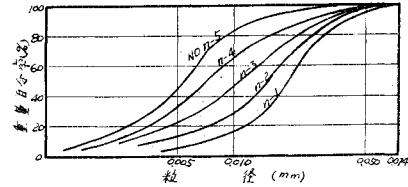


図-9 試料 0.074 mm 以下の粒度分布



写真-5 分散状の本邦カオリン

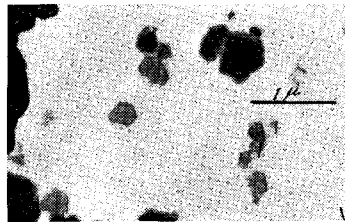


写真-6 Georgia のカオリン



写真-7 モンモリナイト

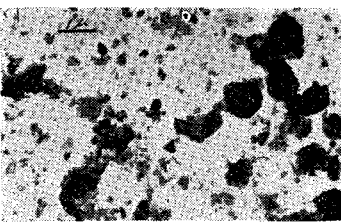


写真-8 大阪湾海底粘土

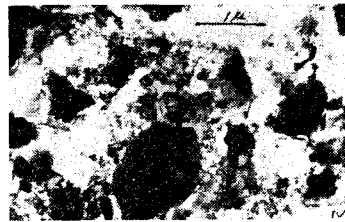


写真-9 大阪湾海底粘土

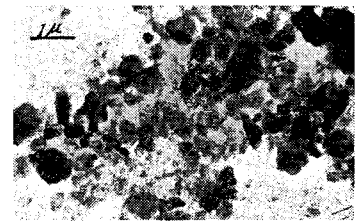


写真-10 風化のあまり進んでいないマサ土



写真-11 風化の進んだマサ土

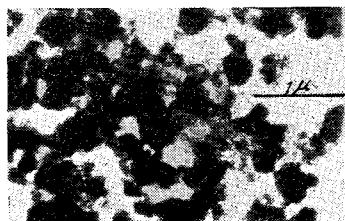


写真-12 関東ローム

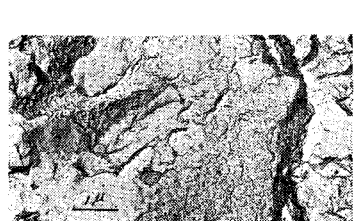


写真-13 締固め土中の雲母

4. 締固め土を構成する各粒子の形態的研究

(1) カオリン (写真—4, 5, 6)

マサ土中の長石が風化するとカオリンが生成される(写真—4)。写真—5は、市販のカオリナイトの一部であり、本邦産のカオリナイトは外国産の Georgia Kaolin (写真—6)に比較して、結晶度が悪い。不規則な六角形あるいは結晶の一部が欠損している形が本邦産のカオリンに多い。写真—6には明確な六角形がみられる。

(2) モンモリナイト (写真—7)

時にマサ土中に存在する。写真—7は市販されているベントナイトより取った試料であるが、形状が判然とせず周辺にケバ状の広がりを持っているのが特徴である。

(3) 大阪湾海底粘土 (写真—8, 9)

カオリン、イライトが見られ、写真—9には群をなして固まっているイライトがみられる。一般に、イライトはモンモリナイトによく似ているが、周辺がモンモリナイトに比して比較的明瞭である。写真—7と比較するとこのことがわかる。

(4) マサ土 (写真—10, 11)

マサ土の微細粒子、カオリン、ハロイサイト(写真—11)がみられる。写真—10は比較的風化の進んでいないものから取った試料であり、それに対し 写真—11は非常に風化の進んだマサ土からのものである。マサ土の風化が進むにつれて、ハロイサイトが多くなることわかる。

(5) 関東ローム (写真—12)

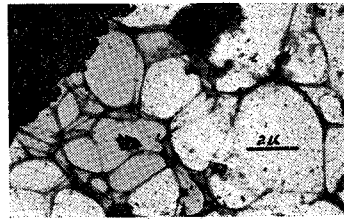
関東ロームの主要粘土鉱物は、アローフェンであるが、写真—12のように球状の形をしているものが多い。アローフェンの形状も漠然としているが、電子回析を行なってみると非晶質のものであることがわかる。この球状粒子は繊維状鉱物の集合体であり、その中に多くの水分が存在して、関東ロームの高含水比の原因ともなっているといわれている²⁹⁾。



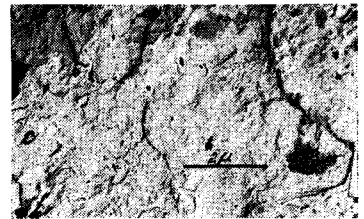
写真—14 砂粒子の表面構造、一磨耗性



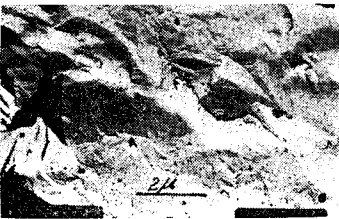
写真—15 裂片性



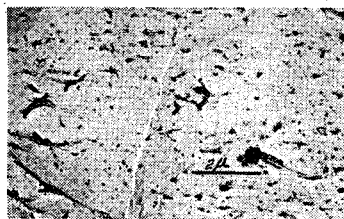
写真—16 結晶性



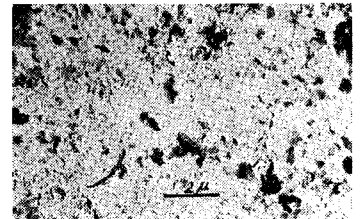
写真—17 平滑面



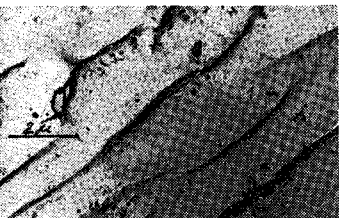
写真—18 起伏面



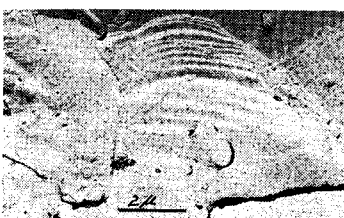
写真—19 多孔面



写真—20 侵食面



写真—21 みそ形面



写真—22 せん断面



写真—23 砂粒子の電顕立体像

(6) 雲母 (写真—13)

雲母はマサ土中に多量に存在している。外見上、無数のウロコ状のものからなっていることがわかる。

(7) 砂粒子の表面構造 (写真—14~23)

現地より採取したままで人工的な力学作用をあたえていないものについて、電子顕微鏡観察の結果おおよそ次のような9種のタイプに分けられる。一次鉱物は、主に石英、長石などに属する表面構造である。

① 磨耗性 (写真—14) : 自然作用で、磨耗したものであり、その細くず (chips) が表面にみられる。

② 裂片性 (写真—15) : 丸石大の裂片が見られるのが特徴である。

③ 結晶性 (写真—16) : 発達中または完成せる結晶性のものがみられる。

④ 平滑面 (写真—17) : 長期自然磨耗の結果、平滑になったものと思われる。

⑤ 起伏面 (写真—18) : 写真—17の平滑面構造に対するものである。不規則的な高低起伏は、微視的にみる時、粒子面のせん断強度を増進させるものである。

⑥ 多孔面 (写真—19) : アバタ面のように、点々とした小孔がみられる。このような粒子が集合体を形成すると自由水のほかにその小孔の中に吸着されている水分も無視できないものとなる。とくに微小孔の中に粘土分が入りこむとなおさらである。

⑦ 侵食面 (写真—20) : 自然作用による長期の化学侵食を受けた結果と思われるものであり、侵食による表層物質の除去作用がみられるのがこの種の特徴である。

⑧ みぞ形面 (写真—21) : 自然作用によってせん断作用をうけた結果によるものであり、この種のものには、みぞの浅いものと、深いものがある。写真—21は比較的深いものである。

⑨ せん断型 (写真—22) : 自然作用による段階的荷

重が、せん断作用をおよぼした結果でありアーチ状の起伏が特徴的であることは、Kransley³⁰⁾らにより立証済みである。

以上は、透過型電子顕微鏡の Replica 法による砂粒子表面の代表的構造形態であるが、走査電子顕微鏡によるものの一例を 写真—23 に示した。砂粒子の立体像がかなり明瞭である。

5. 締固めと粒子の配向 (orientation)

図—2 で示したように、一定の締固めエネルギーのもとで締固められた板状粒子は、含水比の増加するにつれてランダム配向から締固め方向に垂直な面方向に土粒子が平行配列になる。また、一定含水比のもとでは、その締固めエネルギーが増大するにつれて、平行に配向しようとする傾向が著しくなる。本研究では、この傾向を実証するため、また後述の本邦特殊土の締固め特性に解釈根拠をあたえるため、締固め含水比とともに変化する粒子配向の変化を走査型電子顕微鏡および透過式電子顕微鏡で観察した。以下、その結果を述べる。

(1) 大阪湾海底粒土の締固め

(図—10, 写真—24~29)

図—10 は大阪湾海底粘土の締固め曲線であり、図上の点 ②, ③, ④ に対応する試料の走査電顕写真が、お

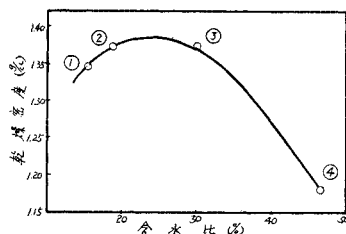
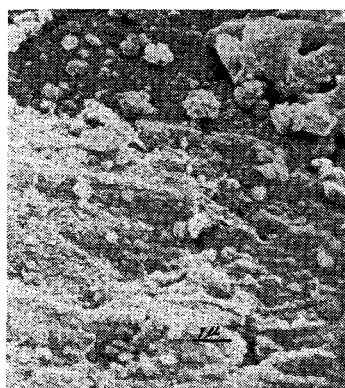
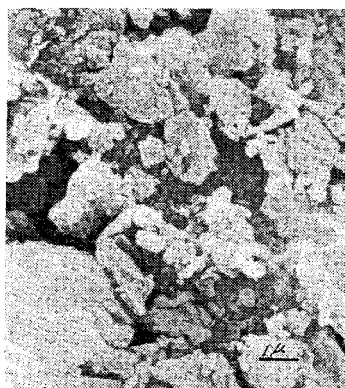
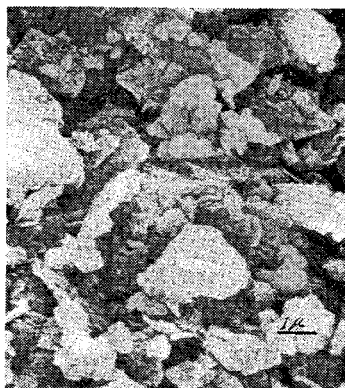


図-10 大阪湾海底粘土の締固め曲線



写真—24 大阪湾海底粘土の締固め, 点② 写真—25 大阪湾海底粘土の締固め, 点③ 写真—26 大阪湾海底粘土の締固め, 点④

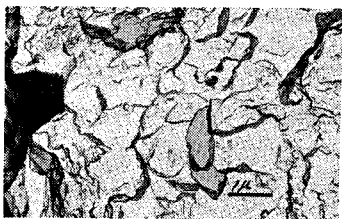


写真-27 大阪湾海底粘土締固め, 点①

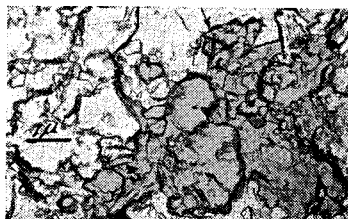


写真-28 大阪湾海底粘土の締固め, 点③

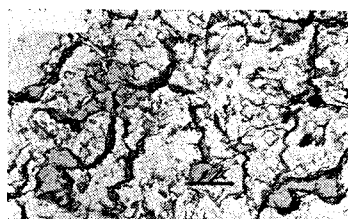


写真-29 大阪湾海底粘土の締固め, 点④

のおの 写真-24, 25, 26 である。また、図上の①, ③, ④ 点に相当する透過型電顕写真を写真-27, 28, 29 に示した。試料はいずれも、締固め方向に垂直な方向に切断したH試料である。写真-24, 25, 26 についてみると、締固め含水比の増加するにつれて、001 面が漸次多くみえてくるのがわかる。この写真では stepped face to face の配列が多くみられ、写真-24, 26 の立体像は図-1に良く似ていることから、走査電顕の利点がよくあらわれていることがわかる。特に写真-24, 25 は両者の締固め乾燥密度を同一にして、含水比のみ違う場合であり、写真-25 の方に多く 001 面がみられる。次に 写真-27, 28, 29 について考察すると、写真-27 に stepped face to face の構造がみられ、写真-28 には Aylmore ら³¹⁾ によって定義された cluster (写真中矢印)、または Domain をなしているところがみられる。Sloane ら²⁹⁾ によれば締固め土の構造が book-cluster をなしていると報告されているが、粘土表面(負電荷)と、辺縁の電荷(正電荷)を考えると、むしろ stepped cluster が形成される可能性が強いものと考えられる。

(2) モンモリナイトの締固め

(図-11, 写真-30, 31, 32)

モンモリナイトの締固め曲線を図-11に示し、図上の点②, ③, ④ に対応する走査型電顕写真を写真-30, 31, 32 に示した。試料はH試料である。分散状態にお

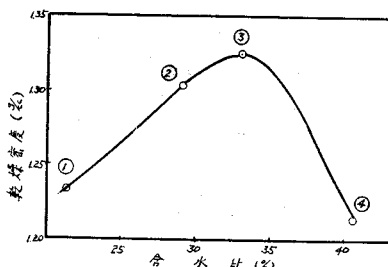


図-11 モンモリナイトの締固め曲線

けるモンモリナイトの透過式電顕像は写真-7に示すごとくケバ状の周辺を有する不規則な形であるが、これを立体像にしてある一面から観察したものが写真-30 のようになるのか、それとも群集しているのかは明瞭でない。いずれにしても、写真は含水比の増加するにつれてモンモリナイトの001面の板状面が多く見え、締固めにおける粒子配向の変化がある。モンモリナイトの形状が不明瞭のため、写真-32には明確な stepped face to face の構造がみられない。また写真-32にはハロイサイトらしきものが混合してみられるが、本邦産のものには不純のものが多いためである。

(3) マサ土の締固め(図-12, 写真-33, 34)

マサ土の締固め曲線を図-12, 図上の点①, ④に相当する構造写真を写真-33, 34に示した。試料切断方向はいずれも締固め方向に垂直な方向である。写真-34には粒子の辺縁と板状面の入り混ったものがみられる。

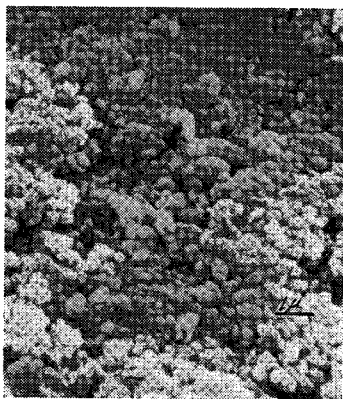


写真-30 モンモリナイトの締固め, 点②

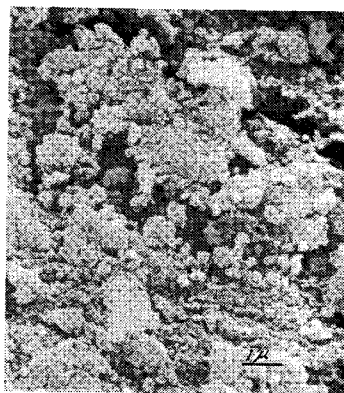


写真-31 モンモリナイトの締固め点③

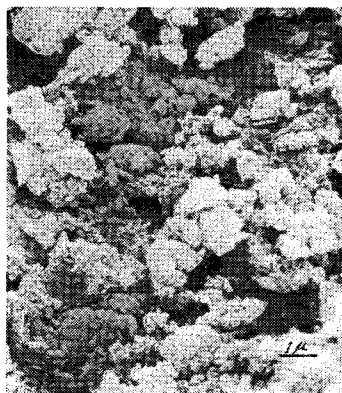


写真-32 モンモリナイトの締固め, 点④

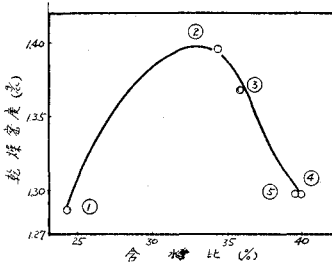


図-12 マサ土の締固め曲線

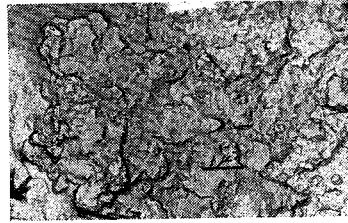


写真-33 マサ土の締固め, 点①

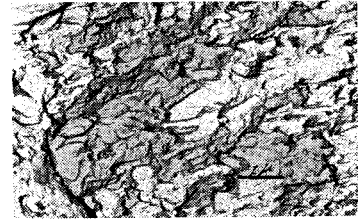


写真-34 マサ土の締固め, 点④

また一次鉱物も混在しているようにみうけられる。写真-34の左下方には、明瞭な stepped face to face の配向構造がみられる。全体を通じていえることは、締固めエネルギーと含水比をどんなに加えても完全な配向を促進することは不可能であり、わずかに相対的配向の問題であることがわかる。

6. 関東ローム, およびマサ土締固めの構造特性と力学的性質の相関性

前に述べたように 関東ロームの球状的形態, 高含水比, 締固め挙動における特異性²⁸⁾, およびマサ土の中空管状の粘土鉱物, 板状でない石英, 長石の一次鉱物, 顕著な破碎性などがその締固め土の構造特性と工学的性質を論ずるにあたって過去の研究とは大いに異なることが予測される。以下, この特殊性に着目して, その収縮特性, 強度特性を検討する。

(1) 軸方向収縮度と粒子の配向 (図-13~図-16)

本実験ではモールド内に締固められたままの供試体を乾燥炉内に入れて, その原長に対する軸方向収縮度を測定した。土の配向の影響を調べる際には, 本来水浸飽和させて含水比の影響を除去すべきであるが, Seed ら¹⁹⁾の研究によれば, 水浸, 非水浸の差による影響はあまりなく, また関東ローム, マサ土を用いて比較した予備実験でも同じことがいえるということがわかったので, この水浸試験を省略した。この場合, 横方向収縮は供試体をモールドに入れたまま乾燥させたので無視することができる。図-13, 14 はおのおの関東ロームとマサ土の締固め方法の相違による軸方向収縮度と含水比の関係, 図-15, 16 はハーバード締固め試験機を用いて締固めエネルギーを変化させた場合のものである。以下, 結果を個条書きにあげて逐次論を進めていくことにする。

① 締固め方法の相違, 締固めエネルギーの違いのいかにかわらず, 軸方向収縮度は, 一般に最適含水比を

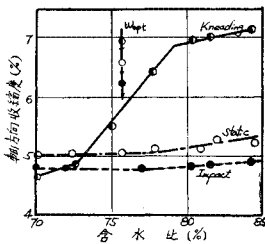


図-13 含水比と軸方向収縮度の関係 (関東ローム)

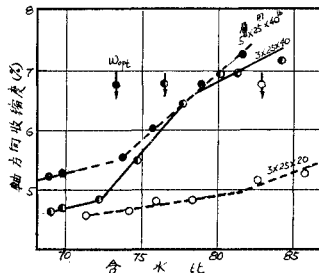


図-15 含水比と軸方向収縮度の関係 (関東ローム)

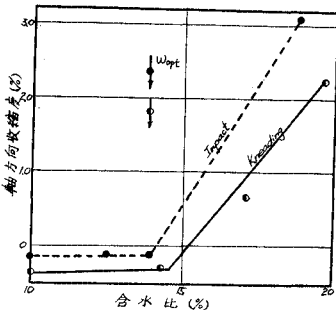


図-14 含水比と軸方向収縮度との関係 (マサ土)

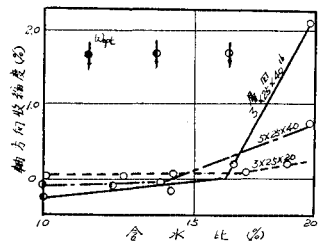


図-16 含水比と軸方向収縮度との関係 (マサ土)

過ぎた時点から, 急激に増加してくる (図-13, 14, 15, 16)。板状粒子が含水比の変化とともに起こる配向の変化は 図-2 のようであるが, この場合最適含水比を越えて湿潤側に来た時点で粒子が平行配列になる傾向が顕著になる。このため, 板状面の水膜は側方よりも厚いので板状面が向いあうようになる時点, すなわち最適含水比を過ぎた時点では, 軸方向収縮が急激に大になることは十分考えられる。このような板状面に適用された締固め土の収縮理論でも関東ローム, マサ土に適用でき, 現象を同じくすることはこれらの図からわかる。写真-10 に示すごとく用いたマサ土にも不規則な板状面が多くみられ (一次鉱物粒子の細分化したもの), ハロイサイトはほとんどみられないのでここに現象を同じくしても決して矛盾しない。関東ロームはその形状, 物理化学的性質も未知のものが多

いので、軸方向収縮度におよぼす影響も判然としませんが、板状土と同じ現象があることは 図-13, 15 に示すとおりである。

② 締固め方法の相違による関東ロームの軸方向収縮度は、Impact, Static, Kneading, 締固めの順に大きくなる(図-13)。粒子配向を促進しているのは、この場合含水比のほかにせん断変形を促進している締固めエネルギーである。ここでせん断変形をもっとも大きく促進しているのは Kneading Compaction である。それゆえ Kneading Compaction の収縮度はもっとも大になる。Static, Impact Compaction をせん断変形から考えるとき試験結果が矛盾しているようにみえるが、これはおそらく両者のエネルギーのわずかな差異が関東ロームの複雑な性状に陰べいされた結果と思われる。

③ マサ土の締固め方法の相違による軸方向収縮度への影響は、関東ロームと逆になっている(図-14)。最適含水比以下はむしろ膨張している傾向にある。これらの傾向は、板状粒子の理論では説明できないものである。マサ土粒子は 破碎しやすく、かつ 鉱物成分の中には長石、石英のほか、雲母などのフレキシブルな粒子(写真-13)を多量に含んでいる。このため締固め中に、マサ土の破碎性は促進され、その破碎状態で締固められた粒子や、フレキシブルな雲母は時間の経過するにつれて、その弾性変形を回復しようとする傾向を持つ。これがマサ土の膨張性を示す原因と思われる。

④ 関東ロームは、締固めエネルギーが大であればあるほど軸方向収縮度は大であるが、マサ土には限界がある(図-15, 16)。マサ土では、3層×25回×40で最大になるが、それ以上のエネルギーをあたえるとむしろ減少する。また、最適含水比以下のマサ土では、膨張もありうる。これらはいずれも、マサ土の破碎性や、フレキシブルな雲母成分が、エネルギーに限度をもたらせているものと考えられる。

(2) 強度と粒子配向(図-17, 18, 19, 20, 21, 22)

構造特性は、また締固め方法の違いによる強度の相違から説明できる。すべての締固め方法による、締固め曲線を同一にし、各締固め含水比の供試体を用いた強度試験を行なった。この場合 3% ひずみ(関東ローム)、あるいは 1.5% (マサ土)に相当する強度をとり、Kneading Compaction に対する比(これを相対強度と名づける)を含水比に対してプロットしたものが 図-17, 18 である。ここで強度基準をとるひずみは任意に比較しやすいようにとったものである。また、図-19, 20 はおのおの同一含水比を有する関東ローム、マサ土の応力と乾燥密度の関係を示したものである。図-21, 22 はそれぞれ前述の強度試験のために用意した各締固め供試体の水浸後の位置(図-21 の矢印)と代表的な応力-ひずみ曲線のパターンを示したものである。水浸後の応力-ひずみ曲線はほぼ含水比の影響を消去し配向の影響だけが作

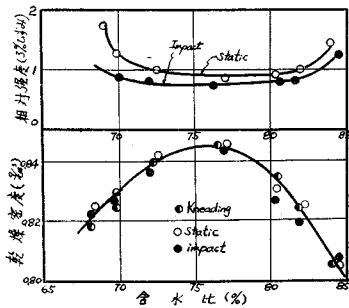


図-17 締固め方法の相違による強度の比較(関東ローム)

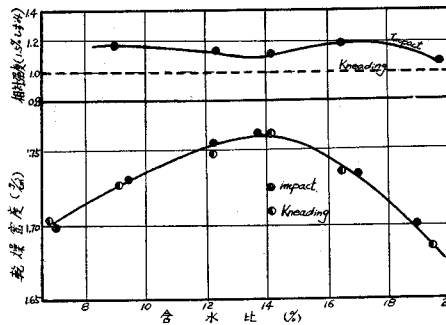


図-18 締固め方法の相違による強度の比較(マサ土)

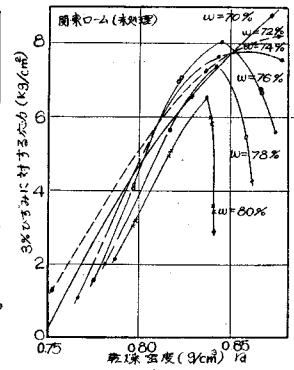


図-19 乾燥密度と強度の関係

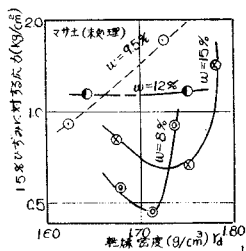


図-20 乾燥密度と強度の関係

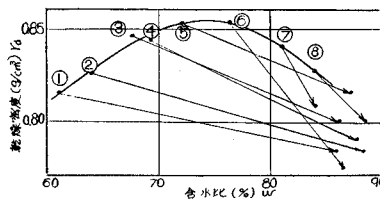


図-21 締固め曲線(1日水浸, 関東ローム, 未処理)

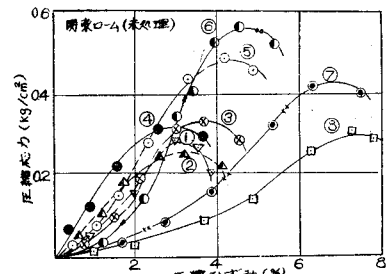


図-22 1日水浸後の応力-ひずみ曲線

用しているものと考えることができる。以下順次、結果と考察を述べる。

① 関東ロームの相対強度(図一17)は、乾燥側、最適含水比前後、湿潤側の三段に分けられる。乾燥側、湿潤側では、ともに Static > Impact > Kneading の順であり、最適含水比前後ではほぼその逆である。Seed¹⁰⁾らの実験によると乾燥側で強度はほぼ一致し、湿潤側で上記の順序になると報告されているが、乾燥側で関東ロームと著しく相違する。乾燥側におけるこの挙動の特異性は、多分関東ロームの複雑な粒子形態と拘束水分に起因するものであろう。湿潤側においては、水分が多くなり正常の粒子配向の働きが回復するためと思われる。いずれにしても、これらは関東ロームの強度の特異性を示すものである。

② マサ土の相対強度(図一18)は締固めの全過程を通じて、常に Impact > Kneading である。この場合もまた、Seed¹⁰⁾によるような結果と同一でない。マサ土は破碎性に富んでいるのでこの際 Impact の破碎にあたる影響は、Kneading より大である。Impact による著しい破碎効果と砂質土の巨大粒子が粒子配向の挙動を不正常にしていることは、Kneading による締固め供試体の軸収縮試験の正常挙動(図一15)と後述している透水性を比較するといっそう明らかになる。この場合 Static な締固めは砂質土についてはあまり意味をなさないと思われるので省略した。

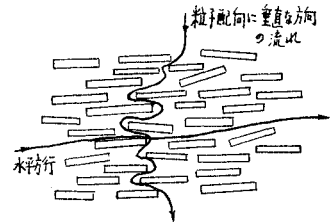
③ 図一19, 20 はおのおの関東ロームとマサ土の乾燥密度と応力との関係である。この図は、まず締固めエネルギーをいろいろに変えた締固め曲線上から、同一含水比に属する締固め密度を読みとり、それに対応する供試体の応力-ひずみ曲線から応力を取ってプロットしたものである。図一19の関東ロームでは含水比 74% までは乾燥密度は応力とともに増加しているけれども、それ以上ではある時点で応力が急激に減少している。含水比 76% 以上の供試体の一部は最適含水比のやや左側にあり、他の一部は右側にある。最適含水比を越すと粒子は急激に一定配向構造となるから、強度は低下する。一方マサ土(図一20)の強度と配向度の関連性はあまりないことは前述した通りであるが、図一20にもその現象は一定性がない。マサ土の強度に影響をあたえるものはむしろ粒子間の摩擦、破碎性、巨大粒子による粘土分の配向構造に対する影響が主である。

④ 図一21, 22 は関東ロームだけの試験結果であるが、図一21の①, ②, ③, ④は綿毛構造(flocculate structure), ⑦, ⑧は配向構造(dispersed structure)と考えられる。その応力-ひずみ曲線は図一22から、前者は急勾配および小ひずみで最大応力に達し、後者はややゆるやかな曲線かつ、ひずみの大きい時点で最大強度に

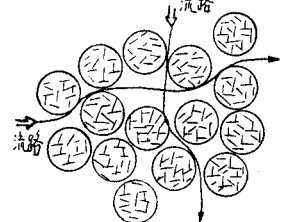
達する特異性を有している。図一21の締固め曲線で、乾燥密度のほぼ等しい供試体②, ⑧と、③, ④, ⑦の二群をおのおの比較すると湿潤側の供試体の弾性係数は大きく低下しており、これはいずれも粒子配向の違いによるものである。

7. 透水性と粒子配向

この研究は細粒土、または粗粒土の透水性にあたる影響を通して、土の配向にあたる影響を調べるためであることはすでに述べた。締固め土中を流れる流れに影響する要因を列挙すると次のとおりになる。



図一23 土粒子配向が流路に及ぼす影響



図一24 Cluster または Packets 間を通る流れ

- (a) 永久要素
 - 1. 粘性 (Viscosity)
 - 2. 圧力 (Pressure)
- (b) 土-水間の相互作用
 - 1. 湿潤熱 (Heat of wetting)
 - 2. イオン濃度
 - 3. 吸着水層の厚さ
- (c) 締固め土の性質
 - 1. 密度
 - 2. 間げき大小の分布, 間げき比
 - 3. Soil-water potential
 - 4. 水路の曲折 (Tortuosity)

本研究におけるような透水試験では、上の (a), (b) 両項を一定とみなすことができる。(c) 項を包括する透水係数の式は古くからある Cozeny-Carman⁹⁾の式を用いて、粒子配向の立場から書き直すと次式のようにになる。

$$k_0 s^2 = \frac{1}{k} \frac{e^3}{1+e}$$

k : 透水係数, e : 間げき比, k_0 : 間げきの形状と流れの曲折などにより決まる定数, s : 土粒子の比表面積

すなわち、 $k_0 s^2$ は粒子配向の度合いを示す項である。ミクロ的に考察するとこの粒子配向の変化は、流れの曲折の変化と露出表面積の変化をもたらす。また、この曲折の変化が透水流れの異方性をもたらすことは図一23より明らかである。この図は粒子配向に垂直な流れが長くなり、抵抗も増すため透水性が減少することを示している。cluster, または packet 間を通る流れはその方向のいかんにかかわらず透水性は一定である³²⁾(図一24)。露出表面積の増加はまた Soil-water potential (surface force) を変化させる。以上は、土の構造の透水性にあたる影響を述べたのであるが、土中において粘土粒子に

くらべて比較的巨大的な粒子が存在するとき、細粒土の配向挙動は阻害されるはずである。本研究はこの考えのもとに実験を行ってきたので、以下、順を追って考察する。なお 図-25 は粒子配向の影響を論ずるに先立って代表的な締固め試料について、間げき比と透水係数の一般的関係を調べ、図-26~29 では粒子配向の傾向を示し、図-30~34 では細粒土のあたえる影響を $k_{0.5}^2$ とある粒径以下の百分比 (U) と対比して示したものである。また、図-35 は分散材処理土の粒子配向におよぼす影響を透水の立場から検討したものである。

(1) 締固め土の透水係数と間げき比 e の関係

(図-25)

粘土の透水係数と間げき比との間の関係は直線的であるといわれているが、ある程度の粗粒土を含んでいる No. 4 群についてみると必ずしも直線的でないことが

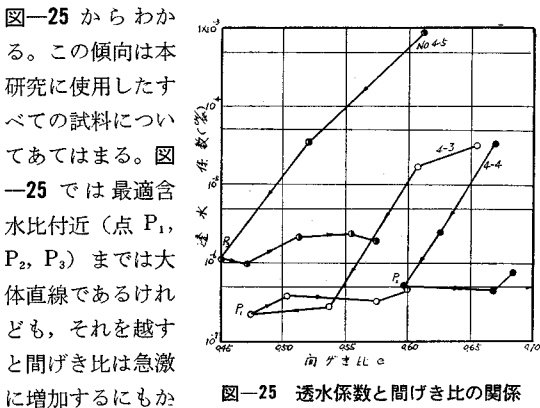


図-25 透水係数と間げき比の関係

図-25 からわかる。この傾向は本研究に使用したすべての試料についてあてはまる。図-25 では最適含水比付近(点 P_1, P_2, P_3)までは大体直線であるけれども、それを越すと間げき比は急激に増加するにもか

(2) 粒子配向と締固め含水比の関係

(図-26, 27, 28, 29)

図-26~29 で用いられた試料の粒度は図-6, 7 で示したが概念的には No. 1 群(図-26 のうち 1-1, 1-2, 1-3, 1-5 を含む)は、No. 3 群(図-27)より粗粒土を多く含み、No. 3 群はまた No. 4 群(図-28)より粗粒である。これを各群についてみると、たとえば No. 1 群の 1-1 は 1-3 より粗であり、1-3 はまた 1-5 より粗粒子を多く含んでいる。ほかの群もこれに準じる。またある粒径以上の粒子だけを段階的に採取して、粗粒子が土粒子の配向におよぼす影響を調べた 図-29 の試料においても、A-1 は A-2 よりも、A-2 は A-3 よりも粗である。A-4, A-5, A-6 もこれに準じる。以下、この結果と考察を述べる。

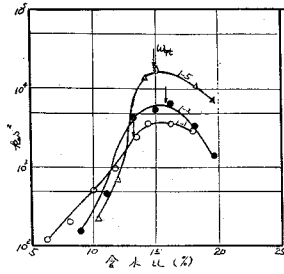


図-26 No. 1 群の $k_{0.5}^2$ と含水比

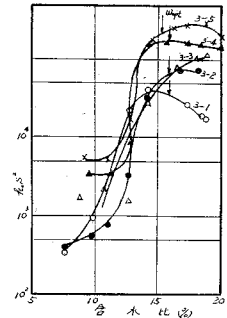


図-27 No. 3 群の $k_{0.5}^2$ と含水比

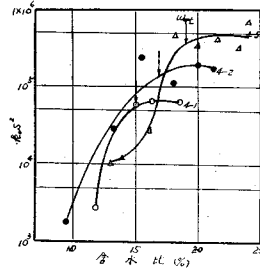


図-28 No. 4 群の $k_{0.5}^2$ と含水比

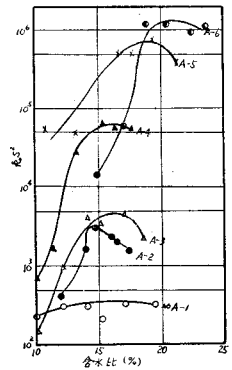


図-29 水ふり試料の $k_{0.5}^2$ と含水比

① 図-26, 27, 28 を比べてみると一般に土の粒度が細かく粘土分が多くなるにつれて粒子の配向は著しく促進される。

② 各群について考えると、一般に粗粒子を多く含む間は細粒土の配向が阻害され粒子の配向度がかえって減少する(たとえば No. 1 群全部, No. 3 群の 3-1)こともあるけれども、各群の中で細粒土が増加するにつれて配向性はまた少し増加してくる。

③ 締固め土がその最適含水比を越すと粒子の配向は限界に至り透水にあたる影響は一定に近づいてくる。含水比に対する透水係数の関係も最適含水比を少し越した時点で最少になり、それ以後はあまり変わらない事実とこの傾向を考え合わせると、粒子配向の影響が透水性にあたる影響の主要部分を占めていることがわかる。

④ 図-29 では除去される細粒土の限界が小さくなるにつれて(A-1, A-2, A-3……と小さくなる)土粒子の配向が著しく促進されることがわかる。この図で注目すべきは No. A-1 である。No. A-1 は細粒土をほとんど含まず粗粒土のみから成っているものである。この曲線はほとんど水平になり、粒子配向の影響はゼロに近い。これはあたかも各粗粒子自体が粘土の cluster として作用している場合に相当し、図-24 のように粗粒土の配向は透水性に無関係である。

(3) 粒度成分の配向におよぼす影響(図-30~34)

この実験で用いた土は 0.074 mm 以下の粒子が 図-9

に示すような粒度分布をもつ土である。No. $n-1$ ($n=1, 2, 3, \dots$) の曲線は前述の条件を 保っている土を締固め、その最小透水係数をとっておおの $U_{0.074}$, $U_{0.020}$, $U_{0.005}$ に対する k_0s^2 (配向度) をプロットしたのが 図-30, 31, 32 である。この場合 $U_{0.074}$ とは粒径 0.074 mm 以下の土粒子を含む百分率であり、 $U_{0.020}$, $U_{0.005}$ もこれに準じて定義される。ここで注目すべきは 図-30, 32 では粒度分布の相違により k_0s^2 の傾向が分離しているが、図-31 では一致している。

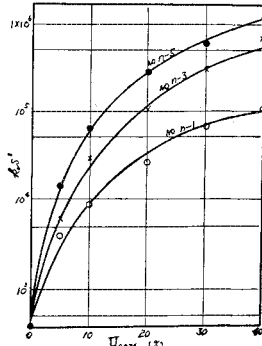


図-30 k_0s^2 と $U_{0.074}$ の関係

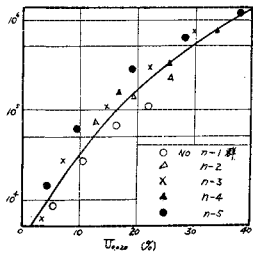


図-31 $U_{0.020}$ と k_0s^2 の関係

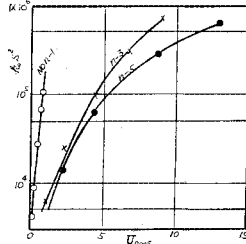


図-32 k_0s^2 と $U_{0.005}$ の関係

すなわち粒子配向の度合いを判断する基準値は $U_{0.020}$ をとればよいことになる。ここでは粒度分布のいかんにかかわらず粒子の配向度合いが統一的に定まってくる。いいかえれば任意の粒度分布をもつ一連の土についてその細粒土部分の含有率が大きければあるほど粒子の配向度は促進されるけれども、それを統一的に比較する基準は 20μ 以下の粒子の含有率である。同様に

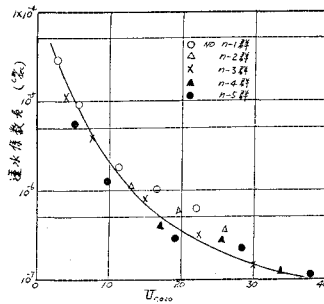


図-33 透水係数と $U_{0.020}$ の関係

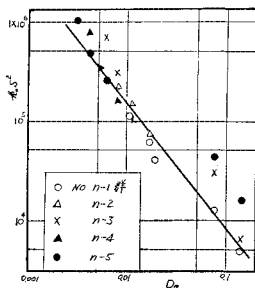


図-34 D_{10} と k_0s^2 の関係

土粒子の配向を問題にする上において透水係数を統一的に比較する基準も $U_{0.020}$ であることは 図-33 から理解できる。この結果をミクロ的に考察すれば 20μ 以下の土粒子の挙動が土粒子全体の配向を決定する主因であり、この範囲内の粒子は配向に際して粗粒子の影響を受けないか、または一定の阻害度をもって影響される規準値であるといえる。以上は含有率に対して粒子の配向度を考察したものであるが、ある有効径 D_{10} に対する配向度の傾向を調べたのが 図-34 である。有効径が大である時には少しばらつくが、ほぼ直線的な傾向をもっている。

(4) 分散材処理土の粒子配向に及ぼす影響(図-35)

土木技術者が締固めにより土質構造に変化をあたえる方法は前述の締固めの形式、締固めエネルギーおよび水量の変化などがあるが、分散材(あるいは凝集材)による添加処理もその一方法である。図-35 はリグニン分散材添加処理の効果を示したものである。

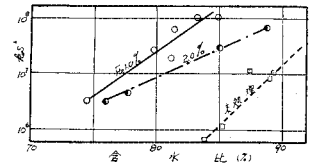


図-35 含水比と k_0s^2 の関係

同一含水量のもとでは処理土による配向度が未処理土より高いことがわかる。この縦軸の差が分散材添加による効果である。分散材は凝集した土粒子をときほぐし分散させ、外的エネルギーがあたえられると個々の粒子の活動が活発に行なわれるので配向度は急激に進捗する。粘性土では一定の締固めエネルギーのもとでより高い乾燥密度を得るために用いられ、締固めエネルギーだけによる密度増加の限界を打破する。

8. 結 論

この研究では締固め土の微視的構造を研究するために、まず電子顕微鏡を用いる手法を述べた。次いでこの手法を用いて各構成粒子の形態と砂質粒子の表面構造を明らかにした後、締固め土の各粒子が含水比の変化とともに配向変化の傾向があることを確かめた。さらにこの配向変化と工学的性質の関連性を求めるために板状粒子でない関東ロームや、破砕性の多いマサ土など、本邦特殊土に材料を取り実験と考察を行なった。この中でも特に細粒土の配向におよぼす影響を締固め土の透水現象から詳細に検討した。以下この研究の主な結論を下に述べる。

① 関東ロームの粘土鉱物は主として球状であり、マサ土は、石英、長石、雲母、ハロイサイトなどを含む粒子から構成されている。これらはいずれも板状粒子ではない。したがって板状粒子を論じた Lambe の締固め理論とは当然その性質の一部を異にする。

② 砂質土の表面構造には、磨耗性、裂片性、結晶性、平滑面、起伏面、多孔面、侵食面、みぞ型面、せん断型など工学的に重要と思われる9種のタイプが存在する。

③ 電子顕微鏡でみられる粘土、モンモリナイト、マサなどの粒子配向は、主に stepped face to face であり、edge to face ではない。その一部は cluster をなしている。また土質構造を研究するには、その立体観、試料作製の容易さ、「小をみて、大を失わざる」走査範囲の大きさからみて、走査電子顕微鏡を用いることが望ましい。

④ 軸方向収縮度は土質、締め固め方法、締め固めエネルギーおよび分散材処理のいかんを問わず、すべて最適含水比を越した時点で急激に増加する。これは平行配向をとった板状面の水膜の蒸発による原因が主である。ただし、マサ土はこの原因によらない。

⑤ マサ土は時に軸方向膨張を起こす。これは、マサ土の破碎性と、フレキシブルな雲母の含量によるものである。

⑥ 関東ロームは一般に締め固めエネルギーの増大とともに軸方向収縮度も大になるが、マサ土は破碎性や雲母の含量が影響してある限界を持っている。Kneading Compaction である場合エネルギーは3層×25回×40#がその最大限界である。

⑦ 締め固め方法の相違による強度の比較では Seed¹⁰⁾の実験と異なる。この相違は関東ロームではその粒形、拘束水、マサ土では Impact の破碎にあたる影響が大であるためと思われる。これらはいずれも粒子の配向からは説明できない。

⑧ 関東ロームは、含水比74%までは乾燥密度が応力とともに増加して、それ以上ではある乾燥密度の時点で応力が急激に減少する。これは粒子配向の理論より説明できるけれども、マサ土ではできない。マサ土の挙動はほぼランダムであり、これは粒子の摩擦、破碎性、巨大粒子による粘土分の配向挙動の阻害などによる結果と考えられる。

⑨ 締め固め土の透水係数と間げき比の関係には、一般にいわれている直線関係をもたない。最適含水比を越した時点でほぼ水平になる。

⑩ 細粒土の配向挙動にあたる影響では、一般に細粒分が多いほど、粒子配向が促進され、最適含水比を越すと配向が一定になってくる。

⑪ 粗粒土ばかりである場合は、配向度増加はほとんどゼロに等しい。粗粒土は細粒土が cluster をなしている場合の挙動に等しい。粗粒土のこのような傾向は、逆に細粒土の配向挙動におよぼす顕著な影響を証明するものである。

⑫ 任意の粒度分布を有する土質中で、土粒子の配向

度を比較する基準は 20μ 以下の含有率 $U_{0.02}$ である。なぜなら、この場合 $k_{0.02}$ と $U_{0.02}$ の関係はある一定の傾向を保っている。また、 D_{10} と $k_{0.02}$ の間にも直線的な関係が存在する。

⑬ 分散材添加土は土粒子の配向を促進する。

本研究では、また砂質土の表面構造と力学作用の関係を明らかにしえなかったが、以後、この問題を追求していく予定である。

この研究を遂行するに当たり、走査電子顕微鏡の撮影に便宜をはかっていたいただいた積水化学の坂田展次氏、土井浩氏、また、実験の協力を惜しまなかった本研究室 沢孝平助手、元大学院生 藤崎忠俊君、大塚高志君の諸氏に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Terzaghi, K. : Erdbaumechanik, F. Deuticke, Vienna, 1925.
- 2) Goldschmidt, V.M. : Undersokelser over Lersedimenter, Nordisk Jordbrugsforskning nos, 4-7, pp. 434~435, 1926.
- 3) Casagrande, A. : The Structure of Clay and its Importance in Foundation Engineering, J. Boston Soc. Civil Eng. 19, 1932.
- 4) Buessem, W.R. and Nagy, B. : The Mechanism of the Deformation of Clay, Clay and Clay Minerals, Proc. II nd Conf. pp. 480~491, 1954.
- 5) Tan, T.K. : Structure Mechanics of Clays, Academia Sinica, Soil Mechanics, Lab. Inst. Civil Eng. and Arch, Harbin China, 1957.
- 6) Rosenquist, I. Th. : Physico-Chemical Properties of Soils, Soil-water Systemss, Proc. A.S.C.E., 85 (SM2), pp. 31~53, 1959.
- 7) Lambe, T.W. : The Structure of Inorganic Soil, Proc. A.S.C.E. 79, pp. 315-1~315-49, 1953.
- 8) Lambe, T.W. The Structure of Compacted Clay, Trans. A.S.C.E. 125, pp. 682~706, 1960.
- 9) Lambe, T.W. : The Engineering Behavior of Compacted Clay, Trans. A.S.C.E. 125, pp. 718~741, 1960.
- 10) Seed, H.B. and Chan, C.K. : Structure and Strength Characteristics of Compacted Clays, Trans. A.S.C.E. 126, pp. 1343~1407, 1961.
- 11) Trollope, D.H. and Chan, C.K. : Soil Structure and the Step-Strain Phenomenon, Trans. A.S.C.E. 126, pp. 1650~1698, 1961.
- 12) Mitchell, J.K. : The Fabric of Natural Clays and its Relation to Engineering Properties, Proc. H.R.B. 35, pp. 693~713, 1956.
- 13) Morgenstern, N.R. and Tchalenko, J.S. : The Optical Determination of Preferred Orientation in Clays and its Application to the Study of Microstructure in Consolidated Kaolin I, II, Proc. Royal Soc. London, Series A, 300, pp. 218~234 (I), 235~250 (II), 1967.
- 14) Martin, R.T. : Quantative Fabric of Wet Kaolinite, Clay and Clay Minerals, Proc. 14 th Conf. 26, pp. 271~287, 1966.
- 15) Quigley, R.M. and Thompson, C.P. : The Fabric of Anisotropically Consolidated Sensitive Marine Clay, Canad. Geotechnical J., 3, 61~72, 1966.
- 16) Mitchell, J.K., Hooper, P.R. and Campanella, R.G. :

- Permeability of Compacted Clay, Proc. A.S.C.E. 91, (SM 4), pp. 41~65, 1965.
- 17) Mitchell, J.K. and Arulanandam, K. : Electrical Dispersion in Relation to Soil Structure Proc. A.S.C.E. 94 (SM 3), pp. 447~471, 1968.
- 18) Matalucli, R.V. et al. : Influence of Grain Orientation on Direct Shear Strength of a Loessial Soil, Eng. Geol. 4, pp. 121~132, 1970.
- 19) Comer J.J. and Turley, J.W. : Replica Studies of Bulk Clay, J. Appl. Phys. 26 (No. 3), pp. 346~350, 1955.
- 20) Sloane, R.L. and Kell, T.R. (1966) : The Fabric of Mechanically Compacted Kaolin Clay and Clay Minerals, Proc. 14 th Conf. 26, pp. 289~296, 1966.
- 21) Smart, P. : Particle Arrangements in Kaolin, Clay and Clay Minerals, Proc. 15 th Conf. 27, pp. 241~254, 1966.
- 22) Pusch, R. : A Technique for Investigation of Clay Microstructure, J. de Microscopic, 6, 963~985, 1967
- 23) Mitchell, J.K. and El Jack, S.A. : The Fabric of Soil-Cement and its Farmation Clay and Clay Minerals, Proc. 14 th Conf. 26, pp. 297~305, 1966.
- 24) Willoughby, D.R. et al. : The Identification of Reaction Products in Alkali-Stabilizad Clays by Electron Microscopy, X-ray and Electron Diffraction, Proc. 4 th Conf. Austr. Rd. Res. Bd. 1-23, 1968.
- 25) Roscow, K.H. : Structure, Discussion, Proc. Geotechnical, Conf. Oslo, II, pp. 167~170, 1967.
- 26) Guillot, J.E. (1969) : Study of the Fabric of Fine Grained Sediments with the Scanning Electron Microscope, J. Sed. Petr., 39 (1), 90~105, 1969.
- 27) 粘土ハンドブック編集委員会 : 粘土ハンドブック, pp. 130~137, 1967, 技報堂
- 28) 久野悟郎 : 土の締固め, pp. 85~93, 1964, 技報堂
- 29) Aomine, S. and Wada, K. : Differential Weathering of Volcanic Ash and Pumice Resulting in Formation of Hydrated Halloysite, Am. Mineralogist, 47, pp. 1024~48, 1962.
- 30) Krinsley, D. and Donahue, J. : Environmental Interpretation of Sand Grain Surface Textures by Electron Microscopy, Geol. Soc. Amer. Bull. 79, pp. 743~748, 1968.
- 31) Aylmore, L.A.G. and Quirk, J.P. : Domain or Turbostratic Structure of Clays Nature, 187, 1046~48, 1960.
- 32) Yong, R.N. and Warkentin, B.P. : Introduction to Soil Behavior, pp. 381~382, 1966, Macmillan, New York, (1970.10.19・受付)
-